

공학석사 학위논문

유연 공구 홀더를 가진
다관절 매니퓰레이터 로봇을
이용한 디버링 시스템 개발

The Development of Deburring System
using the Revolute-jointed Robot Manipulator
with the Flexible Tool Holder

지도교수 최 형 식

2003 년 12 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

정 경 식

本 論文을 鄭敬植의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 趙 琮 來 (印)

委 員 工學博士 鄭 在 鉉 (印)

委 員 工學博士 崔 炯 植 (印)

2004 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

鄭 敬 植

목 차

Abstract

기호설명

그림목차

사진목차

표목차

제 1 장 서론 1

제 2 장 다관절 로봇 매니퓰레이터의 모델링 3

2.1 다관절 로봇 매니퓰레이터의 D-H(Denavit-Hartenberg)

규약에 의한 좌표설정 5

2.2 다관절 로봇 매니퓰레이터의 미끄럼 공간에서의 모델링. 7

2.2.1 4절 링크기구를 이용한 어깨관절의 모델링 7

2.2.2 4절 링크기구를 이용한 팔꿈치관절의 모델링 9

2.2.3 4절 링크기구를 이용한 손목관절의 모델링11

제 3 장 Flexible Tool Holder의 스프링 댐퍼 시스템 모델링 ... 13

3.1 Tool holder의 컴플라이언스 13

3.2 Flexible Tool Holder의 모델링 15

3.3 Flexible Tool Holder의 구성 17

제 4 장 로봇 디버링 시스템의 구성	21
4.1 로봇 매니퓰레이터	21
4.2 로봇 컨트롤러	22
4.3 Flexible tool holder	24
4.4 F/T sensor and Dynamic data logger	25
4.5 A/D Conversion board	28
 제 5 장 디버링 실험 및 고찰	 31
5.1 가공 이론.....	31
5.2 일반 Tool Holder 및 Flexible Tool Holder 적용 실험..	33
5.2.1 Chamfer 크기 2mm일 때	34
5.2.2 Chamfer 크기 2.5mm일 때	35
5.2.3 Chamfer 크기 3mm일 때	36
5.3 실험 결과 및 고찰	37
 제 6 장 결 론	 39
 참고 문헌	 40

The Development of Deburring System using the Revolute-jointed Robot Manipulator with the Flexible Tool Holder

Kyung – Shik Jung

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

In this paper, a deburring system using the revolute-jointed robot manipulator with a flexible tool holder was developed for deburring automation. The flexible tool holder composed of the plunger with spring was developed for three degree-of-freedom operation. The flexible tool holder was applied for compensation of position errors during trajectory tracing or deburring ununiform workpiece. To reduce interacting forces between the high stiffness tool at the end effector and the workpiece during deburring operation, it was designed to operate flexibly to the direction of tangent line on the revolute axis and to the direction of axis.

In this thesis, using the deburring system and accessories of the deburring system, deburring experiments were performed. According to the experimental results, the capability of good deburring operation using the revolute-jointed manipulator robot was shown.

기 호 설 명

d_1	어깨관절의 볼나사의 미끄럼변위
d_2	팔꿈치관절의 볼나사의 미끄럼변위
d_3	손목관절의 볼나사의 미끄럼변위
q_1	어깨관절의 회전각
q_2	팔꿈치관절의 회전각
q_3	손목관절의 회전각
α_1	손목관절 4절링크의 볼나사와 손목관절 사이의 고정각
α_2	팔꿈치관절 4절링크의 볼나사와 팔꿈치관절 사이의 고정각
α_3	어깨관절 4절링크의 볼나사와 어깨관절 사이의 고정각
a_2, a_3, a_4	어깨관절 4절링크의 링크길이
b_2, b_3, b_4	팔꿈치관절 4절링크의 링크길이
c_2, c_3, c_4	손목관절 4절링크의 링크길이
O_i	기저 좌표계에 대한 각 관절의 회전 중심
M_i	각 관절 구동기에 작용하는 자중

그림 목차

Fig 2.1 Structure and coordinates of the robot	4
Fig 2.2 Four bar link structure of shoulder joint	9
Fig 2.3 Four bar link structure of elbow joint	11
Fig 2.4 Four bar link structure of wrist joint	12
Fig 3.1 Compliance of tool holder	14
Fig 3.2 Structure of tool holder	16
Fig 3.3 Cross section of tool holder	16
Fig 3.4 Assembly drawing of tool holder	19
Fig 3.5 Structure and assembly drawing of one DOF tool holder	19
Fig 4.1 Wheatstone bridge circuit	25
Fig 4.2 Analog to digital converter & microcontroller interface	28
Fig 4.3 Signal process of force sensor	30
Fig 5.1 Cutting force of milling process	32
Fig 5.2 Area of material removed when deburring and chamfering	32
Fig 5.3 Output data on X axis	34
Fig 5.4 Output data on Y axis	34
Fig 5.5 Output data on Z axis	34
Fig 5.6 Output data of moment	34

Fig 5.7 Output data on X axis	35
Fig 5.8 Output data on Y axis	35
Fig 5.9 Output data on Z axis	35
Fig 5.10 Output data of moment	35
Fig 5.11 Output data on X axis	36
Fig 5.12 Output data on Y axis	36
Fig 5.13 Output data on Z axis	36
Fig 5.14 Output data of moment	36

사진 목차

Pic 2.1 Outlook of the robot	4
Pic 3.1 Moving direction of flexible tool holder	20
Pic 4.1 Deburring system using revolute-jointed manipulator robot with flexible tool holder	22
Pic 4.2 Outlook of the control system	23
Pic 4.3 Outlook of flexible tool holder	24
Pic 4.4 Air spindle motor	24
Pic 4.5 Rotary bar	24
Pic 4.6 Outlook of force sensor	27
Pic 4.7 Dynamic data logger.....	27
Pic 4.8 A/D converter with MAX197 and PIC board	30

Pic 5.1 Don't apply FTH	34
Pic 5.2 Using FTH	34
Pic 5.3 Don't apply FTH	35
Pic 5.4 Using FTH	35
Pic 5.5 Don't apply FTH	36
Pic 5.6 Using FTH	36

표 목차

Table 2.1 Link parameters for 4 axis manipulator robot.....	6
Table 3.1 Names of fittings on the flexible tool holder	19
Table 4.1 The specification of Max 197	29

1. 서 론

디버링 공정은 가공후 불필요한 부분을 마무리하는 기술로 기계 가공부분에서 효과적인 생산비용 향상의 중요한 부분이다. 특히, 주조물의 디버링 비용은 주조물 전체 비용의 35%를 차지한다. 버를 제거함에 있어서 주물품의 제품품질 고급화와 표준화, 그리고 소음, 분진, 진동으로 인한 작업환경의 열악함을 해소, 기구부의 밸런스 유지, 그리고 공구 부분의 응력 경감을 위해 다관절 로봇에 의한 디버링 자동화 시스템 개발의 필요하다.

디버링 작업과 광택 작업은 이론에 의한 작업보다는 작업자의 경험에 의한 노하우에 기초를 둔다. 이 작업의 자동화와 원하는 표면 거칠기를 얻기 위해서 디버링 가공 경로, 디버링량, 공구의 회전 속도, 접촉힘 및 디버링 깊이를 조정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 접촉힘의 연구와 제어에 중점을 둔다[1-3].

이 접촉힘은 디버링 작업 중에 고 강성의 다관절 로봇의 말단에 있는 디버링 공구와 가공물의 충돌에서 일어난다. 이것은 버의 두께, 높이, 경도에 의해서 충격이 생기고 로봇 작동 오류를 만들고 더 나아가서는 시스템이 멈추게 된다. 이런 오작동을 막기 위해서 The fine-tuned robot approach, Force feedback, The compliant approach 세가지 방법의 개선 접근 방법이 있다.

The fine-tuned robot approach는 일반적으로 많은 파트의 종류와 최소의 떨림, 최고의 신뢰도가 필요하기 때문에 추천되지 않는다. 로봇 작동 때마다 부적당한 로봇의 계인에 의해 실행된다. 따라서, 모든 작업 공간의 티칭 점들을 다시 티칭해야 하고 계인 설정도 다시 해야 한다[4-6]. 두 번째, Force feedback은 디버링 작업의 자동화를 위해 force sensor와 컴퓨터 이용한 것으로

정착된 방법이다. 그러나, 로봇 시스템의 운동 작용의 정의와 제어가 어렵다. 이 시스템은 비싼 force sensor와 데이터를 연산하는 장비로 생산비를 줄이려는 의도와 거리가 멀고, 보통의 작업자에게 실용화하기가 어렵다[7-10]. The compliant approach는 로봇의 경로 오차를 보상하고 다양한 종류의 비정형적 가공물을 적응시키는 것에 컴플라이언스를 이용한 것이다. 비록 모든 로봇이 원래 약간의 컴플라이언스를 가지고 있지만, 이 방법은 한 방향 또는 여러 방향의 컴플라이언스를 가진 특수 디자인된 툴 홀더를 이용한다. 가끔 제어된 두 방향의 컴플라이언스로 디버링 작업에 필요하지만, 일반적으로 가공물의 부드러운 모서리를 만들기 위해서 1축의 컴플라이언스가 필요하다[11-14]. 유연성을 가진 툴 홀더는 컴플라이언스에 의해 외력을 순응시키고 충격을 흡수한다. 특별한 경우에는 스피들 모터와 가공 툴을 일체로 구성하기도 한다[15].

기존의 소형 스칼라 로봇은 가반 하중이나 토크가 매우 약하여 주물의 디버링 작업에 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서 소형이지만 고강성과 고 감속비를 갖는 볼나사 구동의 사절링크 구동기를 적용하여 기존 산업용 로봇보다 고토크 용량을 가지며 병렬로봇보다는 작업반경이 넓은 장점을 갖는 새로운 구조의 다관절 형태의 다관절 로봇 매니퓰레이터와 그 말단 축에 컴플라이언스를 가진 툴 홀더를 부착한 디버링 시스템을 직접 제작하여 이의 구조와 성능을 분석하였고, 이를 로봇에 적용하여 디버링 실험을 수행하고 분석하였다[16-17].

2. 다관절 로봇 매니퓰레이터의 모델링

사절링크를 이용한 새로운 폐쇄인(closed-chain)구조의 다관절 로봇 매니퓰레이터의 구조는 Fig. 1과 같이 4축으로 구성된다. 기저 축은 수평방향으로 회전운동을 하는 구조이고 나머지 관절들은 볼나사를 이용한 상하방향으로 회전운동을 하는 다관절 구조이다. 일반적인 산업용 다관절 로봇은 회전축에 하모닉 드라이버나 RV와 같은 감속기를 채용한다. 하지만 하모닉 드라이버는 기구적으로 강성이 약해서 매니퓰레이터의 상단 부에만 사용하고, RV는 기어를 대체한 고강성의 볼베어링을 이용하여 강성은 있으나 부피가 크고 중량이 무거워 하단 부에만 채용한다.

이러한 구조적인 문제를 해결하기 위해 볼나사 채용의 4절 링크기구로 구성된 고강성을 갖는 새로운 형태의 구동기를 채택한 로봇 매니퓰레이터에 대해 살펴본다. 구동기는 볼나사 구동모터가 채용된 볼나사 시스템으로 볼나사의 미끄럼 운동은 4절 링크기구를 동작시켜 매니퓰레이터의 어깨, 팔꿈치 및 손목의 회전관절을 구동한다. 개발된 시스템의 순기구적 모델링을 위해 D-H(Denavit-Hartenberg) 규약에 의한 로봇의 좌표를 설정하고 4절 링크기구에 의한 모델링을 통하여 미끄럼 공간에서 볼나사의 직선운동을 표현한다.



Pic. 2.1 Outlook of the Robot

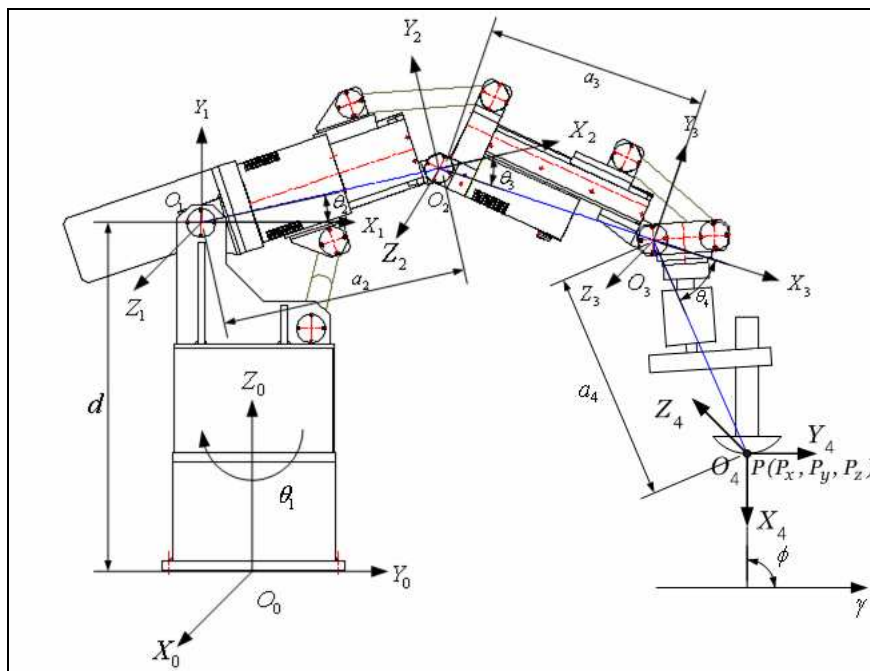


Fig. 2.1 Structure and Coordinates of the Robot

2.1 다관절 로봇 매니퓰레이터의 Denavit-Hartenberg 규약에 의한 좌표 설정

D-H 규약은 Fig. 2.1에서 4개의 파라미터 길이(a_i), 비틀림(α_i), 오프셋(d_i), 각도(θ_i)를 이용하여 각 동차변환 A_i 를 4개의 기본 변환행렬의 곱으로 식(2.1)과 같이 표현한다. 여기서, 유일한 변수는 각도 θ 이므로, $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$, ($i = 1, 2, 3, 4$)이다.

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_ic_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_is_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Table 2.1을 이용하여 행렬 A_1, A_2, A_3, A_4 를 계산하면

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다.

Table 2.1 Link Parameters for 4 Axis Manipulator Robot

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	-90	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*
3	a_3	0	0	θ_3^*
4	a_4	0	0	θ_4^*

이 행렬을 이용하여 T_0^4 의 행렬을 구할 수 있다.

$$T_0^4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} R_0^4 & d_0^4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & -s_1 & c_1 (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2) \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & c_1 & s_1 (a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2) \\ -s_{234} & -c_{234} & 0 & -(a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서, $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, ($i=1,2,3,4$) 이다.

2.2 다관절 로봇 매니퓰레이터의 미끄럼 공간에서의 모델링

매니퓰레이터의 2, 3 및 4 축 관절의 운동은 각각의 관절에 부착된 사절링크의 볼나사 구동에 의해 이루어진다. 로봇의 운동에 4 절 링크의 질량 및 관성 모멘트의 영향이 있으나 구조상 중량의 대부분을 차지하는 볼나사와 가이드가 로봇 링크에 부착되고 4 절 링크의 한 링크만이 영향을 미치나 이것의 질량과 관성 모멘트는 로봇 링크의 그것에 비하여 무시할 정도로 작다. 볼나사에는 엔코더가 부착된 서보모터가 직접 연결되어 있어 볼나사의 미끄럼 운동은 변위 d 만이 계측되므로 매니퓰레이터의 운동방정식을 이동거리 d 와 관절 회전각 q 의 관계로 표현한다. 이를 위하여 각 관절을 구동하는 사절링크 구조를 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 4절 링크기구를 이용한 어깨관절의 모델링

직선운동을 회전운동으로 변환하는 사절링크를 이용하여 어깨관절의 회전각 q_1 으로 구동하는 구조를 Fig. 2.2 에서 나타낸 것이다. 여기서 a_3 는 어깨관절과 팔꿈치관절을 연결하는 부분이다. 운동 형태는 사절기구에서 d_1 부분이 미끄럼운동을 하면 a_1 을 제외한 나머지 내부 각들과 함께 어깨관절이 회전하는 구조이다. 볼나사를 구동하여 제어하는 직선 이동거리 d_1 과 회전각 q_1 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
d_1^2 &= a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3a_4 \cos \beta_1 + 2d_1a_2 \cos \alpha_1 \\
&= A_1 + B_1 \cos \beta_1 + C_1d_1
\end{aligned} \tag{2.3}$$

여기서

$$\begin{aligned}
A_1 &= a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 \\
B_1 &= -2a_3a_4 \\
C_1 &= 2a_2 \cos \alpha_1
\end{aligned}$$

이다. 식 (2.3)에서 a_2, a_3 및 a_4 는 고정된 링크길이 이다. 식 (2.3)을 볼나사의 미끄럼 변위 d_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$d_1 = \frac{C_1 + [C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{0.5}}{2} \tag{2.4}$$

미끄럼 변위를 시간에 관해 미분하면 다음과 같이 속도 및 가속도를 구할 수 있다.

$$\dot{d}_1 = -[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{0.5} B_1 \sin \beta_1 \dot{\beta}_1 \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{d}_1 &= -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{1.5} B_1^2 \sin^2 \beta_1 \dot{\beta}_1^2 \\
&\quad - [C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{0.5} (B_1 \cos \beta_1 \dot{\beta}_1^2 + B_1 \sin \beta_1 \ddot{\beta}_1)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

식 (2.5)와 식 (2.6)을 이용하면 q_1 과 d_1 의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\beta}_1 = \dot{q}_1 = R_{11} \dot{d}_1 \tag{2.7}$$

$$\ddot{\beta}_1 = \ddot{q}_1 = R_{12} \dot{d}_1^2 + R_{13} \ddot{d}_1 \tag{2.8}$$

여기서

$$R_{11} = \frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{-0.5}}{B_1 \sin \beta_1}$$

$$R_{12} = \frac{-2}{B_1 \sin \beta_1} + \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} R_{11}^2$$

$$R_{13} = -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{0.5}}{B_1 \sin \beta_1}$$

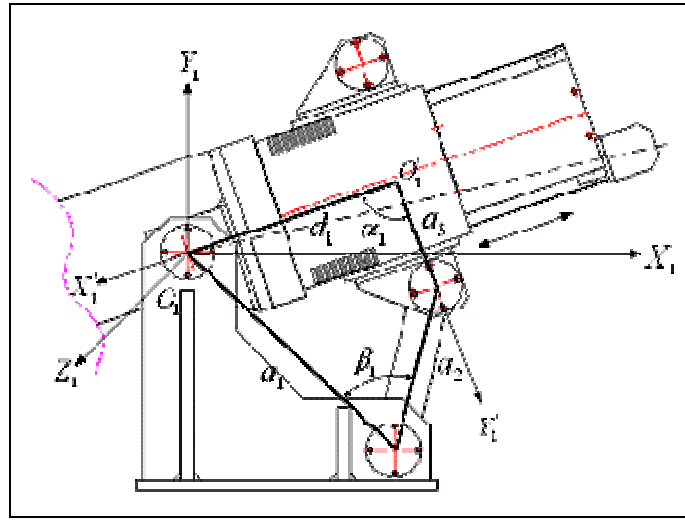


Fig. 2.2 Four bar link structure of shoulder joint

2.2.2 4절 링크기구를 이용한 팔꿈치관절의 모델링

팔꿈치관절 부분에 적용된 사절기구는 Fig. 2.3 에 나타난 바와 같이 손목관절의 구조와 유사하다. Fig. 2.3 에서 b_3 는 손목관절과 어깨관절을 연결하는 부분이며 볼나사 구동의 미끄럼 변위는 d_2 이다. 팔꿈치관절의 각을 결정하는 β_2 와 미끄럼 변위 d_2 의 관계식은 다음과 같다.

$$d_1^2 = A_2 + B_2 \cos \beta_2 + C_2 d_2 \quad (2.9)$$

$$A_2 = b_3^2 + b_4^2 - b_2^2$$

$$B_2 = -2b_3b_4$$

$$C_2 = 2b_2 \cos \alpha_2$$

식 (2.9)에서 b_2, b_3 및 b_4 는 고정된 링크길이이고 α_2 와 N_2 는 고정된 각이다. 팔꿈치관절의 식과 유사하게 식 (2.9)의 d_2 를 시간에 관해 미분하면 q_2 와 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\beta}_2 = -\dot{q}_2 = R_{21} \dot{d}_2 \quad (2.10)$$

$$\ddot{\beta}_2 = -\ddot{q}_2 = -R_{22} \dot{d}_2^2 - R_{23} \ddot{d}_2 \quad (2.11)$$

여기서

$$R_{21} = \frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2 \cos \beta_2)]^{-0.5}}{B_2 \sin \beta_2}$$

$$R_{22} = \frac{-2}{B_2 \sin \beta_2} + \frac{\cos \beta_2}{\sin \beta_2} R_{21}^2$$

$$R_{23} = -\frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2 \cos \beta_2)]^{0.5}}{B_2 \sin \beta_2}$$

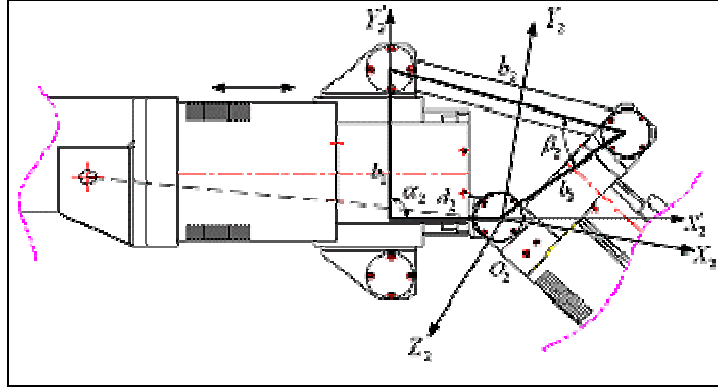


Fig. 2.3 Four bar link structure of elbow joint

2.2.3 4절 링크기구를 이용한 손목관절의 모델링

손목관절 부분에 적용된 사절기구도 Fig. 2.4 에 나타난 바와 같이 다른 관절의 구조들과 유사하다. q_3 와 d_3 의 관계식을 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\beta}_3 = \dot{q}_3 = R_{31} \dot{d}_3 \quad (2.12)$$

$$\ddot{\beta}_3 = \ddot{q}_3 = R_{32} \dot{d}_3^2 + R_{33} \ddot{d}_3 \quad (2.13)$$

여기서

$$R_{31} = \frac{\left[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos \beta_3) \right]^{-0.5}}{B_3 \sin \beta_3}$$

$$R_{32} = \frac{-2}{B_3 \sin \beta_3} + \frac{\cos \beta_3}{\sin \beta_3} R_{31}^2$$

$$R_{33} = -\frac{\left[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos \beta_3) \right]^{0.5}}{B_3 \sin \beta_3}$$

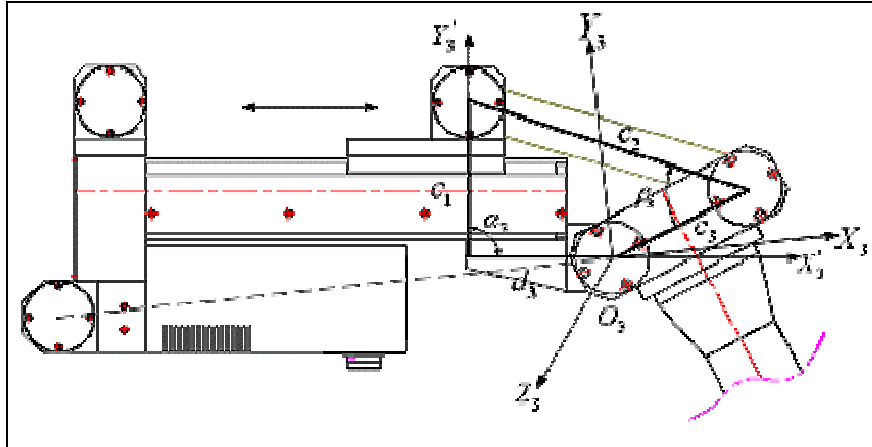


Fig. 2.4 Four bar link structure of wrist joint

위와 같은 4절 링크 구조를 가진 매니플레이터 로봇의 고강성의 힘을 디버팅 작업에 적용하기 위해서 디버팅 툴과 가공물 사이의 충격힘을 줄일수 있고 로봇의 티칭작업시 발생하는 위치오차 보정을 위해 flexible tool holder가 필요하다.

3. Flexible Tool Holder의 스프링 댐퍼 시스템 모델링

로봇에 의한 디버링 자동화 시스템은 로봇과 주변 장치들로 구성된다. 로봇에 의한 디버링 자동화에서 가장 광범위하게 사용되는 회전 버 공구(Rotary file)의 강성과 로봇의 강성으로 인해 작업시 발생할 수 있는 각종 오류를 방지할 수 있는 디버링 공구에 설치하는 Flexible Tool Holder의 모델링을 수행하였다.

3.1 Tool holder의 컴플라이언스

회전형 버 공구는 다른 공구와 달리 버를 제거할 때에 생기는 충격을 흡수하지 못한다. 또한 버의 양이나 경도가 일정하지 않으므로 로봇이나 스핀들 모터에 일시에 충격이 가하여지고 결과가 불규칙하여 질 수 있다. 로봇의 경우에는 충격이 올 때 에러 선언에 이어 작동 중단이 올 수도 있다. 이를 보완하기 위하여 공구의 홀더부에 별도의 컴플라이언스를 주어야 한다. 컴플라이언스란 디버링을 위한 외력에 대하여 공구나 모터 또는 그 홀더가 순응하여 충격을 흡수하고 탄력적으로 변형하는 것을 말하는데 간단한 경우에는 공구의 홀더를 이용하고 특수한 경우에는 정밀한 모터 스핀들과 공구, 서스펜션을 통합한 시스템으로 최적 제작하는데 값이 비싸게 된다. 일반적으로 Tool Holder에 의한 컴플라이언스는 다음과 같이 분류할 수 있다.

-다방향 컴플라이언스: Fig. 3.1의 a와 같이 스피들을 고무등의 탄성체로 감싸는 경우로 대개 스피들의 길이 방향으로 추력을 받는데 이용되며 고무의 탄성 복원이 느려 작업의 정밀도가 떨어진다.

-두방향 컴플라이언스: Fig. 3.1의 b와 같이 직각 방향이나 두 방향으로 컴플라이언스를 갖는다.

-단방향 컴플라이언스: Fig. 3.1의 c와 같이 공구의 길이와 직각으로 한 방향으로 스프링에 의하여 컴플라이언스를 갖는다.

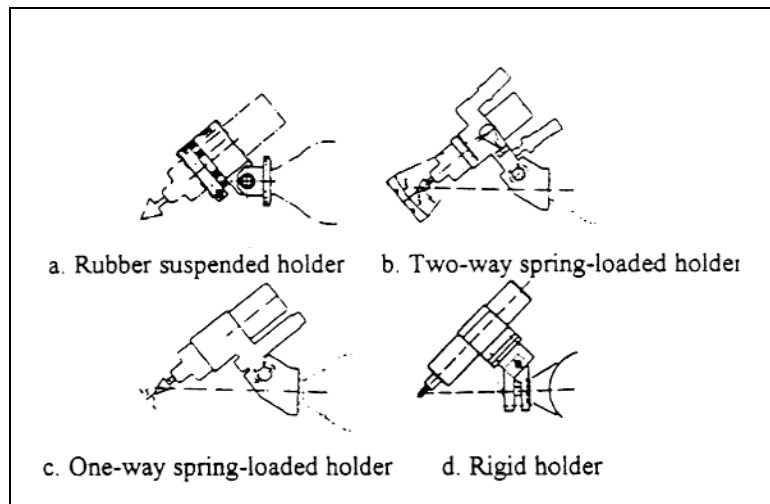


Fig. 3.1 Compliance of tool holder

본 연구에서 제안한 Tool Holder는 다방향 컴플라이언스에 사용되는 고무의 느린 탄성 복원력을 보완하기 위해 압축 스프링이 내장된 플런저를 사용하여 다방향 컴플라이언스를 적용하였다.

3.2 Flexible Tool Holder의 모델링

제안된 Flexible Tool Holder는 Fig. 3.2의 압축 스프링에 의해 디버링 작업 시 툴과 가공물의 접촉력 F 구면 조인트를 축으로 l_2 만큼 떨어진 스프링이 있는 부분에 전달되고, l_2/l_1 만큼 감소된 힘은 Fig. 3.3의 단면에서 구면 조인트의 지지에 의한 축의 분력 F_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_r &= \frac{l_2}{l_1} F \\
 &= kx(\cos \theta_1 + \cos \theta_2 + \cos \theta_3 + \cos \theta_4) \\
 \theta_2 &= 60^\circ - \theta_1 \\
 \theta_3 &= 60^\circ + \theta_1 \\
 \theta_4 &= 60^\circ + \theta_2 \\
 &= 120^\circ - \theta_1
 \end{aligned}$$

또, Fig. 3.3에서 힘이 작용하는 반대쪽은 축과 플런저의 끝이 떨어지기 때문에 힘이 작용하는 지점에 시계방향과 반시계방향으로 90° 이내의 스프링만 압축된다. 따라서, 각 스프링의 사이 각이 60° 이므로 $0^\circ \leq \theta_1 \leq 60^\circ$ 이 된다.

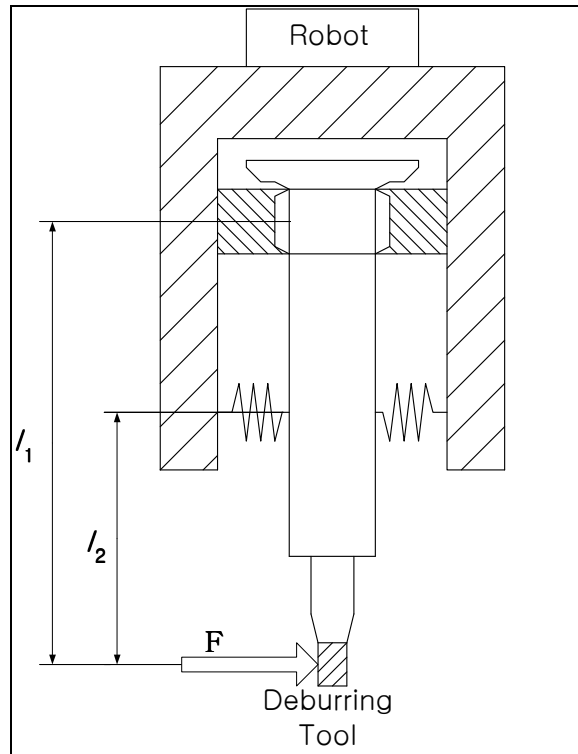


Fig. 3.2 Structure of Tool Holder

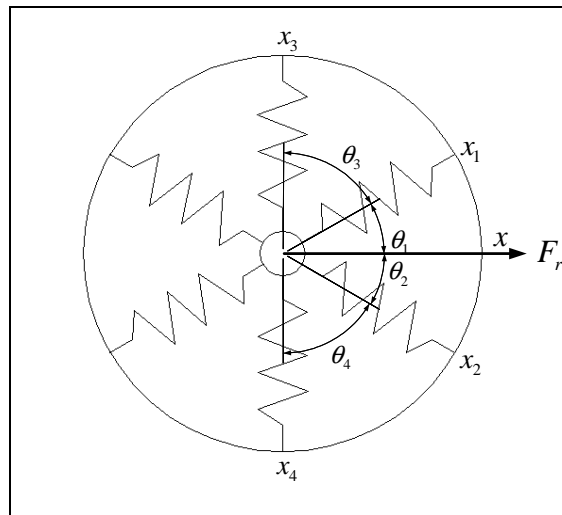


Fig. 3.3 Cross section of Tool Holder

3.3 Flexible Tool Holder의 구성

개발된 Flexible Tool Holder는 로봇 매니퓰레이터를 이용한 디버링 시스템의 자동화를 위해 스프링을 이용하는 3자유도의 유연한 공구고정장치의 구조에 대한 것으로, Rotary Bur, 추지석, 다이아몬드 Bur 및 그라인더와 같은 강성이 큰 디버링 공구를 스프링 장력에 의해 회전축의 접선방향으로 유연하게 움직이고 압축스프링으로 축방향으로 유연하게 움직일 수 있도록 고안함으로써 로봇 매니퓰레이터의 경로 티칭 작업시에 발생하는 위치오차를 보상하며 불균일한 가공면을 자연스럽게 디버링 가공함으로써 작업면의 균일한 가공과 작업공구 및 구동모터에 부하를 경감하여 원활한 디버링 작업을 가능하게 한다.

Flexible Tool Holder는 구동모터를 취부하는 상단부분(Fig. 3.4)과 디버링 공구를 취부하는 하단부분(Fig. 3.5)으로 분리될 수 있으며 상단부의 상부 하우징과 하부 하우징의 이음부분에 구면 조인트로 축의 중심을 잡는다. 상단부분은 스프링을 장착한 플런저를 다수 배열하고 구동모터 고정부에 결합하여 회전축의 수직 방향으로 2자유도의 유연성을 가질 수 있으며 동시에 지지축의 상하 이탈 및 회전을 방지하는 구조를 갖는다. 하단부는 구동모터의 축방향으로 유연성을 갖는 스프링을 장착한 스플라인축을 구동모터 콜렉트 척에 취부하여 구동모터와 함께 회전하며 회전 시에 축 방향으로 유연하게 미소 이동을 할 수 있는 구조로 되어 있다.

Fig. 3.4에서 상부하우징은 로봇 구동 말단장치에 취부되고 회전력의 전달을 위해 키홈을 파고 세트 스크루로써 축을 고정한다. 또 하부하우징과 결합되어 구면 조인트를 고정시킨다. 지지축은 구면 조인트와 결합되어 좌우방향 움직일 수 있게 하는 동시에 자전하게 해주고 스페이스와 록 너트로 고정하여 지지축

이 구면 조인트에서 빠지지 않게 해준다. 스프링 플런저는 하부하우징 단면도와 같이 배열되어 지지축의 고정 및 회전을 방지하고 축의 좌우방향 움직임을 스프링 장력에 의해 유연하게 한다.

크로스 홀더는 지지축과 양쪽으로 두 개의 구동모터 취부기를 연결시켜주는 역할을 하고 10° 마다 드릴링 작업으로 마킹된 각조절 포인트는 크로스 홀더에 체결된 스프링 플런저에 의해 10° 씩 각을 회전할 수 있다. 그림(21)은 스프링 플런저, 크로스 홀더, 구동모터 취부기를 나타내는 단면도이다.

Fig. 3.5는 하단부를 나타내는 그림으로 구동모터의 척에 고정되는 하우징 속에 압축스프링, 스프라인 축과 변위를 제한하는 세트 스크루로 구성되어 있다. 하우징에 압축스프링이 삽입되고 다음에 스프라인 축이 삽입된다. 스프라인 축과 하우징은 가이드 레일 역할을 하게 되고, 세트 스크루를 변위 제한 레인과 고정 탭에 체결함과 동시에 스프라인 중공축에 디버링 공구를 고정하고 아무리 큰 힘이 걸려도 유연하게 제한된 일정 변위만 움직이게 된다.

위와 같이 본 장치는 상단부의 구동모터 취부기에 힘을 지지축에 전달하고 이것을 스프링 플런저에 전달되어 축에 수직되게 2자유도를 가지고 유연하게 움직인다. 하단부는 디버링 공구에 전달된 부하를 스프라인 축과 하우징의 가이드 레인을 따라 움직이고 압축 스프링의 장력에 의해 1자유도로 조절된다. 이상과 같이 본 장치의 상단부와 하단부에 의해서 3자유도의 유연성을 가지게 된다.

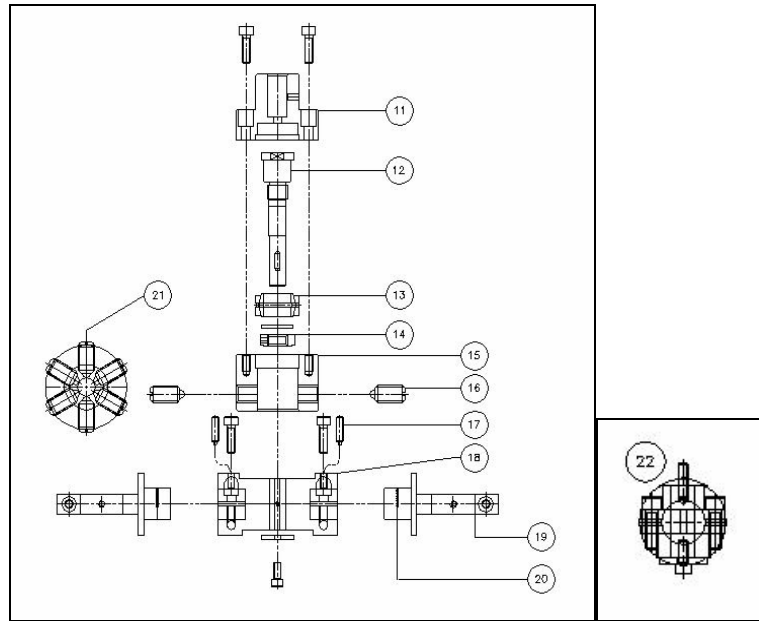


Fig. 3.4 Assembly Drawing of Tool Holder

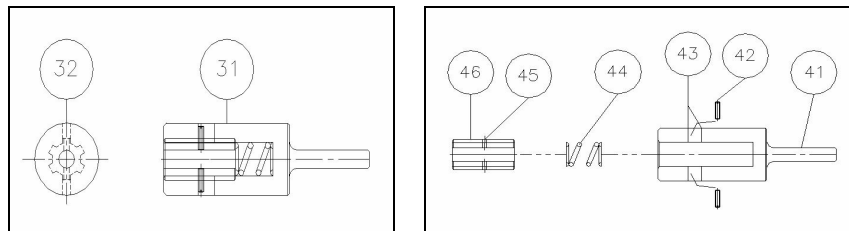


Fig. 3.5 Structure and Assembly Drawing of 1 DOF Tool Holder

Table 3. 1 Names of fittings

No.	명칭	No.	명칭	No.	명칭
11	상부하우징	18	크로스 홀더	41	컬렉트 척
12	지지축	19	취부기	42	세트 스크루
13	구면 조인트	20	각조절 포인트	43	변위 제한 레인
14	록 너트	21	하부 하우징 단면도	44	압축 스프링
15	하부하우징	22	크로스 홀더 단면도	45	고정탭
16	스프링 플런저	31	정면 단면도	46	스플라인 축
17	스프링 플런저	32	측면 단면도		



Pic. 3.1 Moving Direction of Flexible Tool Holder

4. 로봇 디버링 시스템의 구성

본 논문에서 사용된 디버링 시스템은 4자유도 다관절 로봇 매니퓰레이터, 개발한 유연 툴 홀더, 반발력 측정을 위한 force sensor, force sensor 데이터를 얻기 위한 퍼스널 컴퓨터로 구성되었다. 하드웨어 시스템의 구성은 아래와 같다.

- 로봇 매니퓰레이터
- 로봇 컨트롤러
- Flexible tool holder
- F/T sensor and Dynamic data logger
- A/D 변환 보드
- 퍼스널 컴퓨터

4.1 로봇 매니퓰레이터

본 논문에서는 소형이지만 고강성과 고 감속비를 갖는 볼나사 구동의 사절링크 구동기를 적용하여 기존 산업용 로봇보다 고토크 용량을 가지며 병렬로봇보다는 작업반경이 넓은 장점을 갖는 새로운 구조의 다관절 형태의 로봇 매니퓰레이터를 디버링 작업에 적용하였다. 허리부는 기존 감속기를 사용하는 회전형이고 나머지 세 관절은 제안한 사절링크 구동기를 적용하였다. 기저 축은 수평 회전운동을 하도록 구성되고 나머지 관절들은 상하방향으로 회전운동을 하는

다관절 형태이다.



Pic. 4.1 Deburring System using Revolute-Jointed Manipulator Robot
with Flexible Tool Holder

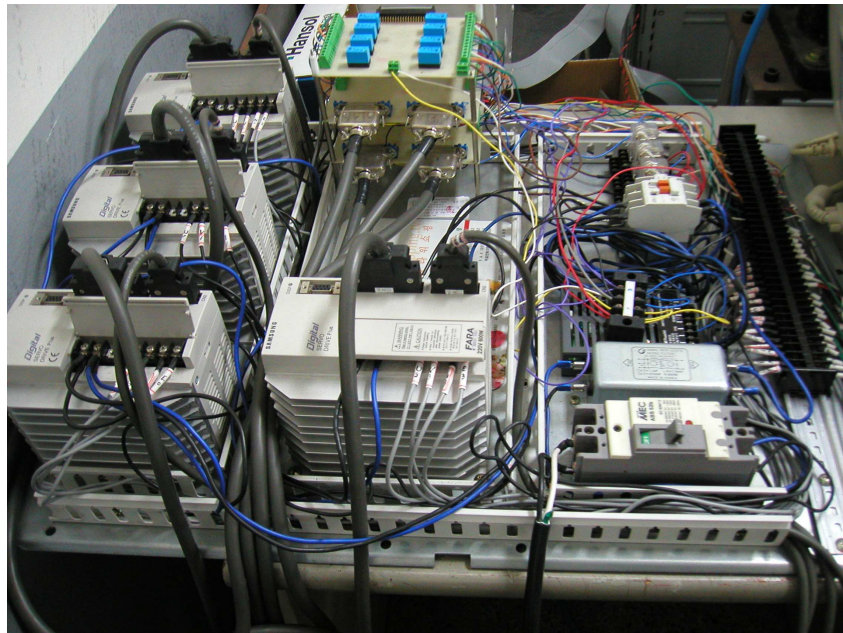
4.2 로봇 컨트롤러

로봇의 모션 제어기는 MMC 제어기를 사용하는데, 이는 자체 메모리 1KByte를 내장하고 있어 상위제어기와 빠른 고속통신을 할 수 있고, DSP 프로세서를 내장하여 고속연산이 가능하다. 본 연구에서 제어 알고리즘은 다음과 같은 Proportional-Integral-Derivative-Feedforward (PIDF) 제어 루프를 구현한다.

$$Y_{vn} = K_R [K_{pP} \times PE_n + K_{pI} \times PS + K_{pD} \times (PE_n - PE_{n-1}) + K_{pF} \times V_n]$$

PIDF 성능을 갖는 MMC 모션 제어기를 사용하여 Fig. 7과 같은 제어 시스템을 구성하고 로봇의 구동 시험을 수행하였다. 제어시스템의 Hardware 구성은 다음과 같다.

- 상용 MMC 모션 제어기
- 개발된 입출력부
- AC 서보 모터 및 드라이버
- 리밋 센서



Pic. 4.2 Outlook of the control system

4.3 Flexible tool holder

로봇 매니플레이터를 이용한 디버링 시스템의 자동화를 위해 스프링을 이용하는 3자유도의 유연한 공구고정장치의 구조에 대한 것으로, Rotary Bar, 추지석, 다이아몬드 처리 Bar 및 그라인더와 같은 강성이 큰 디버링 공구를 스프링 장력에 의해 회전축의 접선방향으로 유연하게 움직이고 압축스프링으로 축방향으로 유연하게 움직일 수 있도록 고안함으로써 매니플레이터의 경로 티칭 작업시에 발생하는 위치오차를 보상하며 불균일한 가공면을 자연스럽게 디버링 가공함으로써 작업면의 균일한 가공과 작업공구 및 구동모터에 부하를 경감하여 원활한 디버링 작업을 가능하게 한다.



Pic. 4.3 Outlook of Flexible Tool Holder



Pic. 4.4 Air Spindle Motor



Pic. 4.5 Rotary Bar

4.4 F/T sensor and Dynamic data logger

모델 NO. UFS-3012A25인 Universal Force-Moment Sensor는 스트레인 게이지 (Strain Gage) 형태의 로드셀은 외부 하중에 의한 감지부의 탄성변형을 감지부 표면에 부착된 포일 스트레인 게이지(Foil strain gage)를 휘스톤 브릿지 회로 (Wheatstone Bridge Circuit)로 Fig. 4.2와 같이 형성되어 있고 스트레인 게이지의 저항변화와 힘의 관계를 이용한 것으로 브릿지 회로의 입력전압을 V 라고 하고, 출력전압 변화를 ΔE 라 하면, 입 · 출력 전압비와 스트레인 게이지의 저항값들과의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 센서에서 검출된 신호는 케이블을 거쳐 센서 안에 있는 증폭기로 보내어 진다.

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

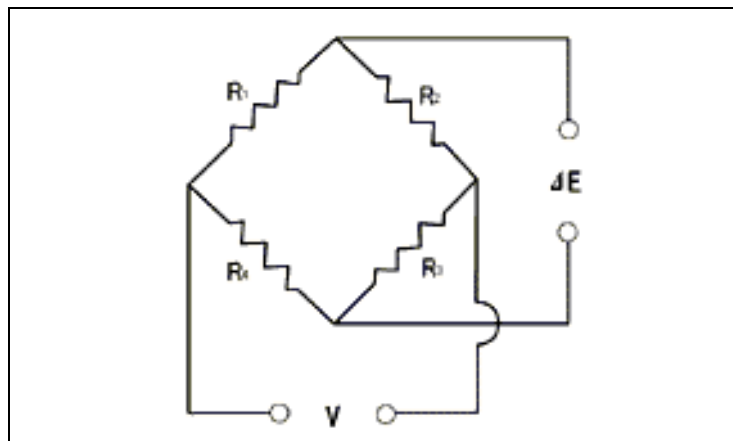
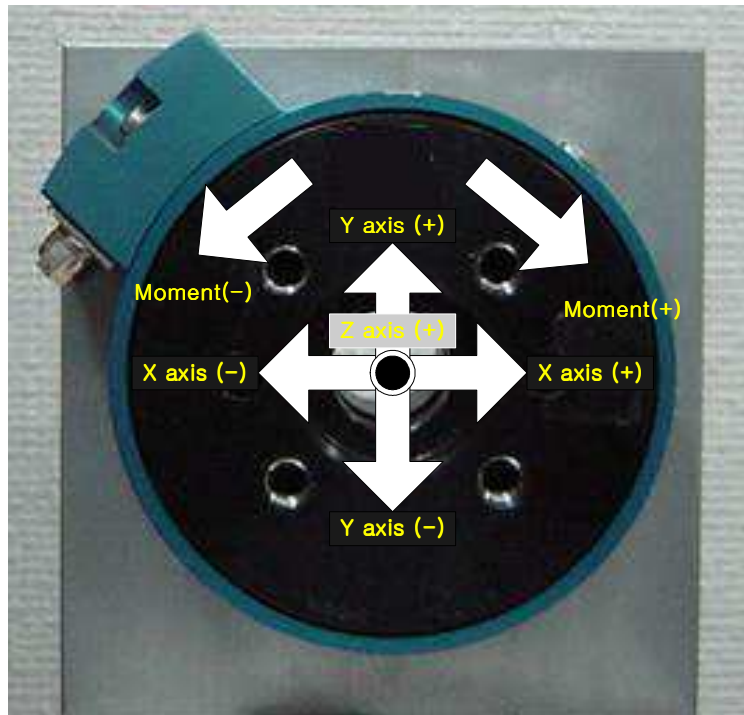


Fig. 4.1 Wheatstone Bridge Circuit

센서의 정격 하중은 F_x, F_y 는 $11Kg_f$, F_z 는 $22Kg_f$, M_z 는 $85cm \cdot Kg_f$ 이다. 외경은 $75mm$, 폭은 $31.8mm$, 무게는 $310g$ 이다.

신호 처리를 위한 Dynamic Data Logger는 신호 증폭회로, 노이즈 필터링 회로, 전원공급장치로 구성된다. 신호 증폭회로는 Force sensor의 미약한 출력신호를 증폭한다. 출력 신호가 고증폭되거나 회로를 따라 흐를 때 원하지 않는 유입된 노이즈를 Analog Device의 1B31소자의 필터링 기능을 이용하여 필터링하고, 안정화 회로를 거쳐 디지털 신호로 변환될 수 있도록 A/D변환보드의 입력채널로 연결된다. 노이즈나 어떤 파형을 갖는 전압을 공급하면 측정된 출력신호에 공급 전압의 영향이 직접 나타나기 때문에 Force sensor의 스트레인 게이지에 excitation 전압을 공급하는 전원공급기가 필요하다. Analog Device의 1B31소자의 안정한 전압공급 기능으로 공급전압의 크기를 프로그래밍하여 사용한다. 이와 같은 장치들은 출력신호의 증폭과 필터링의 소요시간을 저감시켜 출력신호의 빠른 검출과 변환할 수 있다.



Pic. 4.6 Outlook of Force Sensor



Pic. 4.7 Dynamic Data Logger

4.5 A/D Conversion board

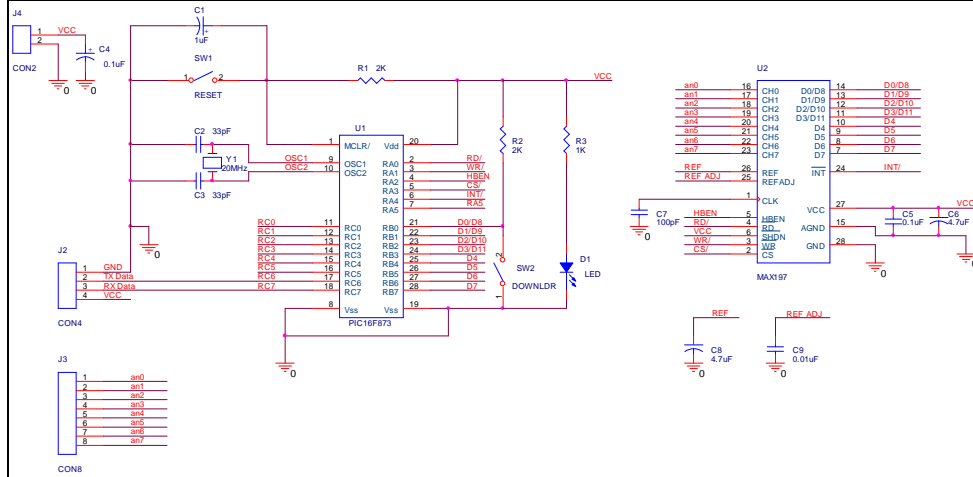


Fig. 4.2 Analog to Digital Converter & Microcontroller Interface

A/D 변환은 무한개의 데이터를 유한개의 데이터로 근사시키는 것이다. 이를 위해서 아날로그 신호의 시간축과 진폭축에 대해서 이산화(digitize)를 해야하는데, 이것을 각각 표본화, 양자화라고 한다. 샘플러(sampler)에 의해 표본화된 신호에 대해서 양자화가 행하여지는데 이 변환과정에 시간이 걸린다. 변환과정 중에 입력신호가 바뀌면 올바른 변환이 될 수 없으므로 표본화 데이터를 다음 표본화까지 유지시켜주는 홀더(Holder)가 필요하다. 샘플링간격의 결정은 A/D변환시 샘플링 시간은 최고 주파수의 2배 이상 이어야 한다는

($T = \frac{1}{f_s} \leq \frac{1}{2f_m}$) Nyquist 정리를 따른다. 주기 T를 이것보다 더 크게 하면 표

본화 신호가 원신호와 다르게 되는 aliasing effect가 생긴다. N비트 2진 코드

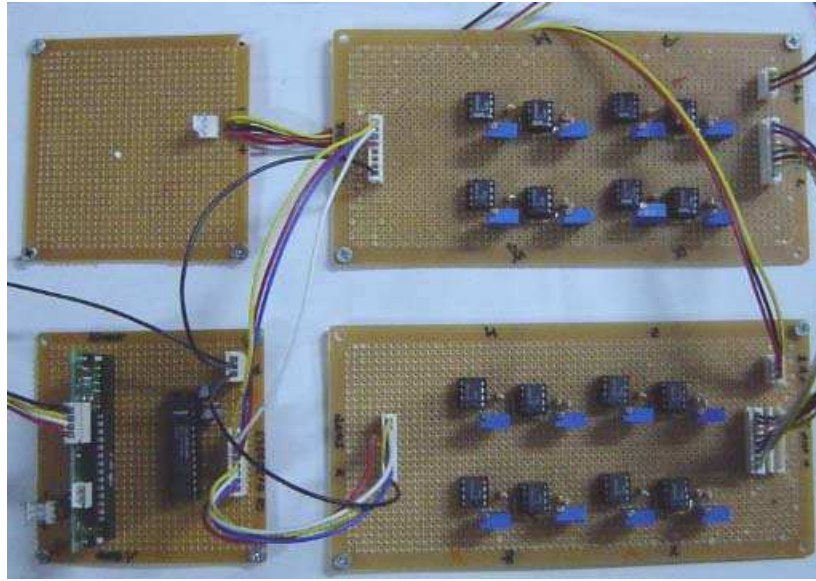
에 의한 분해능은 $\frac{FS}{2^n - 1}$ 이 된다.

증폭된 신호는 A/D 변환기의 입력으로 들어간다. 여기에 사용한 Analog to Digital Converter (MAX197)의 특징은 Table 4.1과 같다.

Table 4. 1 The specification of Max 197

Function	Description
Resolution	12-Bit, 1/2LSB Linearity
Operation voltage	Single +5V
Software-selectable Input Ranges	$\pm 10V$, $\pm 5V$, 0V to 10V, 0V to 5V
Fault-Protected Input Multiplexer	$\pm 16.5V$
Analog Input Channel	8
Conversion Time	6 μ sec
Sampling Rate	100 ksps
Acquisition Control	Internal or External
Clock	Internal or External

이와 같은 기능에 의해 AD 변환값은 Fig. 4.3과 같이 마이크로 컨트롤러에서 연산되고 MAX232 통신 모듈에 의해 PC로 보내어진다.



Pic. 4.8 A/D Converter with MAX197 and PIC Board

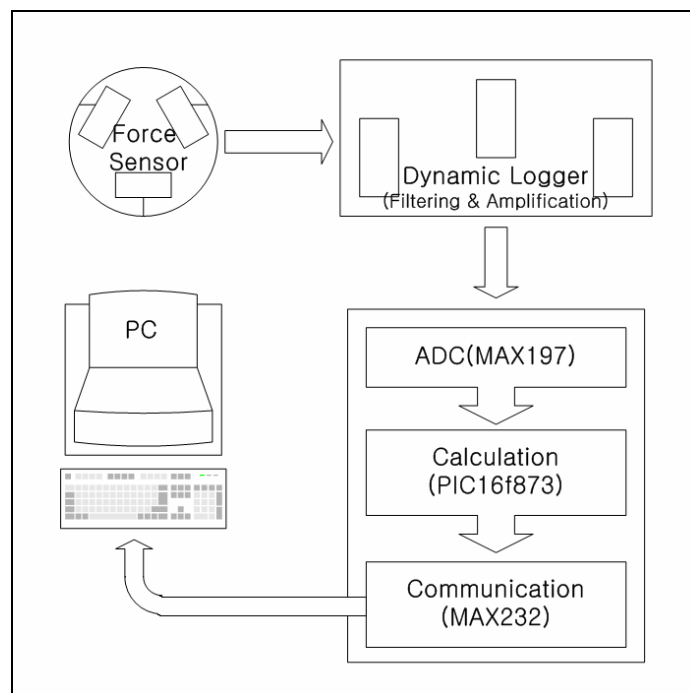


Fig. 4.3 Signal Process of Force sensor

5. 디버링 실험 및 고찰

다관절 로봇에 의한 실제 디버링 가공시에 직면하는 로봇의 경로의 부정확과 공구의 떨림, 로봇의 공구가 공작물에 접근할 때의 문제점 등 많은 문제들이 발생한다. 이러한 문제 중 디버링 가공시 고강도의 공구와 가공물이 충돌하더라도 유연하게 디버링하는 실험을 다관절 로봇 말단 부착된 Flexible Tool Holder를 적용하여 Force sensor에서 측정한 데이터를 이용하여 분석한다.

5.1 가공 이론

Fig. 5.1은 force sensor의 각 축의 측정 방향과 절삭력의 3분력 방향을 각각 표시한다. 절삭력은 절삭방향의 주분력 F_c , 축방향 분력 F_a , 축에 직각으로 작용하는 배분력 F_ω 로 분해할 수 있다. 일반적으로 절삭력은 주분력 F_c 를 의미한다. 절삭력은 아래와 같이 표현된다.

$$F_c = \left[\frac{(33000 P F_m)}{2 V_c} \times Bw \times Bh + C^2 \right]$$

$$V_c = 0.262 \times D \times rpm \quad (5.1)$$

식 (5.1)에서 F_c 는 절삭력, P 는 디버링 스핀들 모터의 출력, F_m 은 디버링 공구의 이송속도, V_c 는 절삭속도, D 는 톨의 지름을 나타내고, Fig. 5.2에서 Bw 는 버의 넓이, Bh 는 버의 높이, C 는 챔버 크기를 나타낸다.

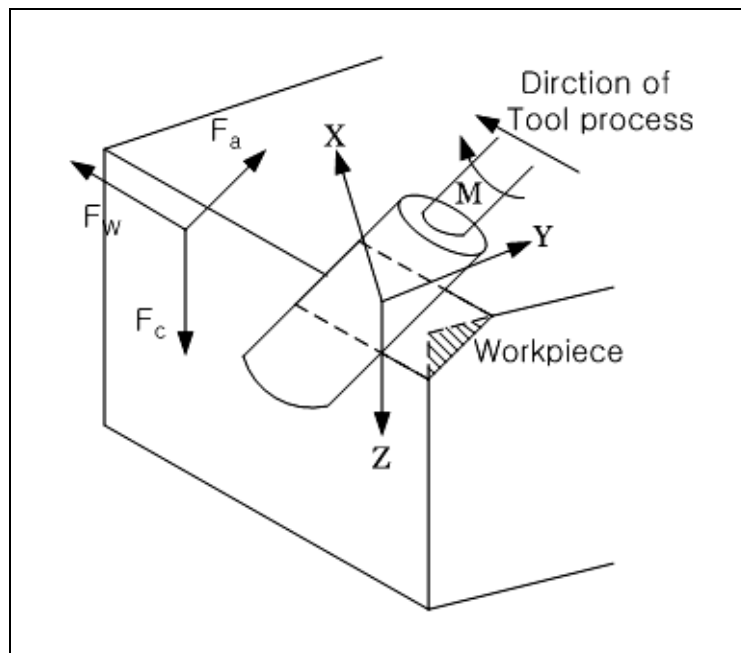


Fig. 5.1 Cutting Force of Milling Process

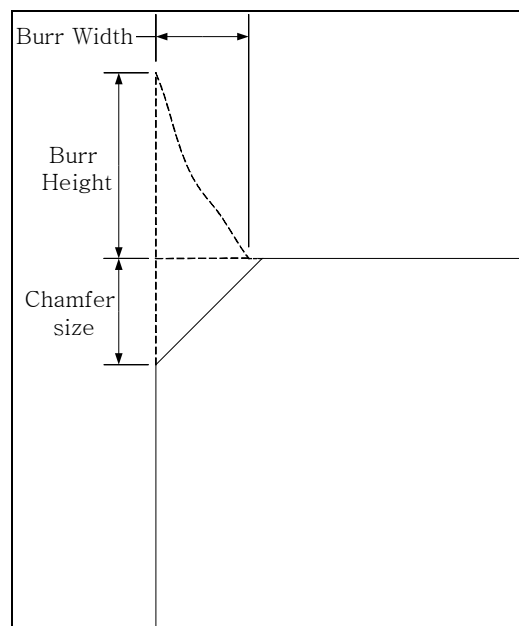


Fig. 5.2 Area of Material Removed when Deburring and Chamfering

5.2 Flexible Tool Holder 적용 실험

이 실험의 목적은 다관절 매니퓰레이터 로봇 말단에 Flexible Tool Holder를 디버링 작업에 적용하였다. Flexible Tool Holder에는 로터리 버(Pic. 4.5)를 장착한 에어 스핀들 모터(Pic. 4.4)가 사용되었으며, 2HP의 에어 컴프레서를 사용하였다. 회전공구의 구동력은 3 Kg/cm^2 의 에어 공기압을 사용하였고 회전 공구의 표면 속도는 일정하게 하고 Fig. 5.2의 알루미늄 바(AL6061)의 가공 단면적(Chamfer size)에 따른 가공 정도를 Flexible Tool Holder를 적용하지 않은 디버링 작업과 비교 한다.

힘 측정에는 엔드이펙터(End Effector)와 로봇 사이에 장착되어 있는 4자유도 Force Sensor로부터 받은 데이터를 AD Conversion board를 통하여 변환되어지고 이 데이터는 시리얼 통신을 통하여 컴퓨터에 저장된다.

컴퓨터에 저장된 데이터를 각 축에 10(N)의 힘으로 캘리브레이션된 데이터로 나누어주어 힘의 값으로 나타낸다.

5.2.1 Chamfer 크기 2mm일 때

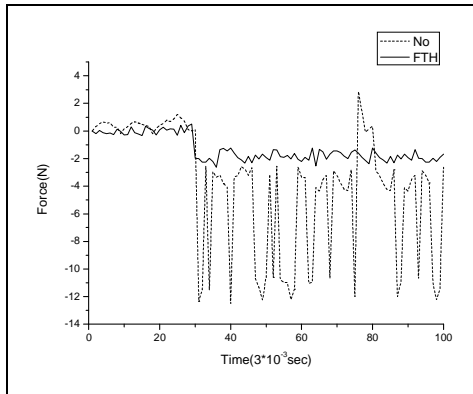


Fig. 5.3 Output Data on X Axis

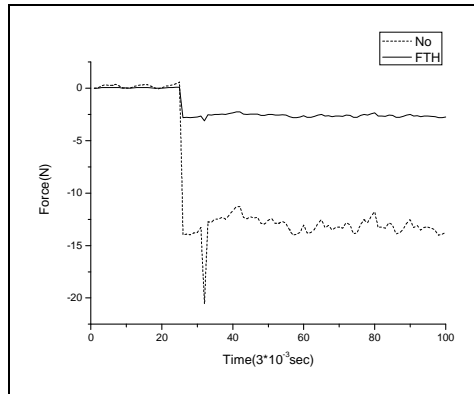


Fig. 5.4 Output Data on Y Axis

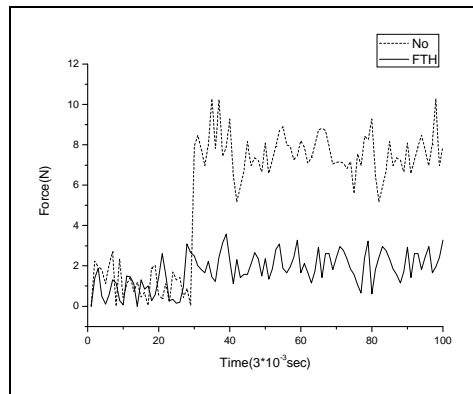


Fig. 5.5 Output Data on Z Axis

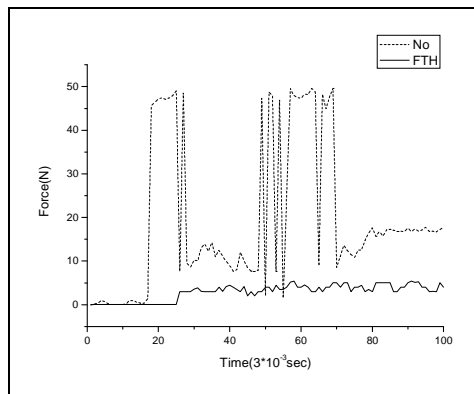
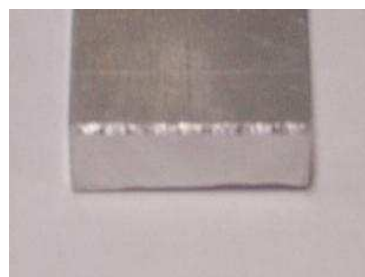


Fig. 5.6 Output Data of Moment



Pic. 5.1 Don't Apply FTH



Pic. 5.2 Using FTH

5.2.2 Chamfer 크기 2.5mm일 때

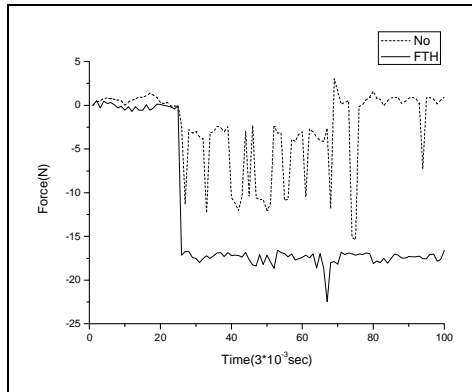


Fig. 5.7 Output Data on X Axis

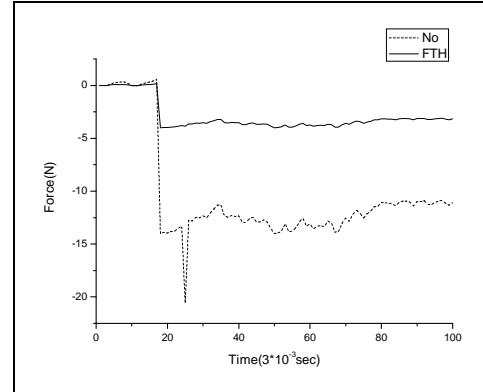


Fig. 5.8 Output Data on Y Axis

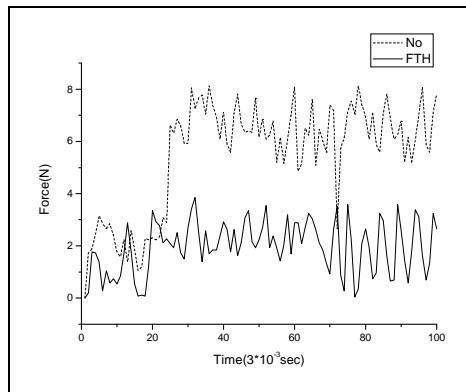


Fig. 5.9 Output Data on Z Axis

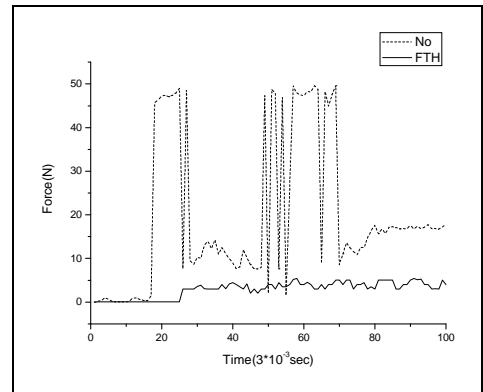


Fig. 5.10 Output Data of Moment



Pic. 5.3 Don' t Apply FTH



Pic. 5.4 Using FTH

5.2.3 Chamfer 크기 3mm일 때

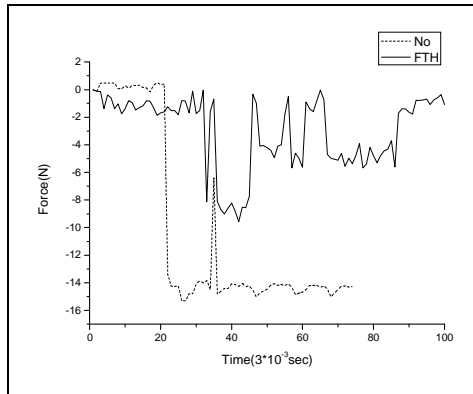


Fig. 5.11 Output Data on X Axis

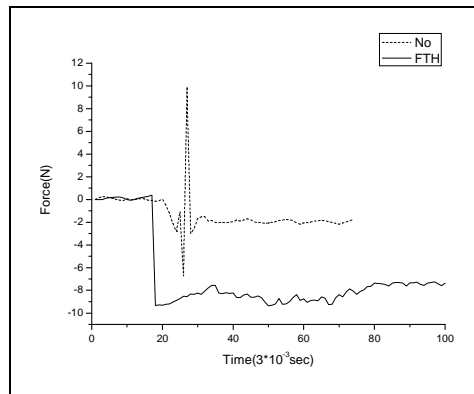


Fig. 5.12 Output Data on Y Axis

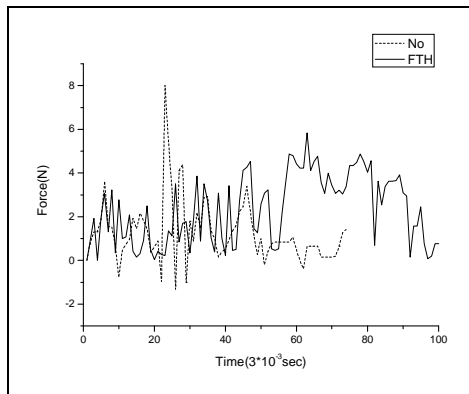


Fig. 5.13 Output Data on Z Axis

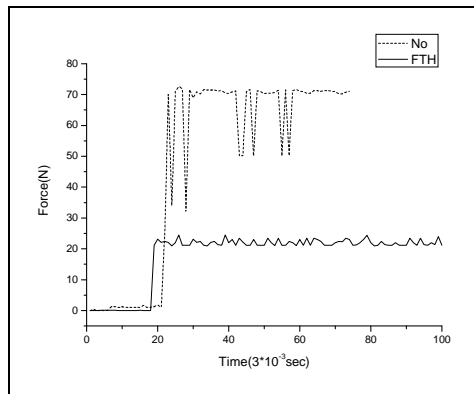


Fig. 5.14 Output Data of Moment



Pic. 5.5 Don't Apply FTH



Pic. 5.6 Using FTH

5.3 실험 결과 및 고찰

Force sensor의 힘방향은 Pic. 4.6에 의해 중심을 기준으로 (+)방향과 (-)방향을 가진다. 따라서, 실험결과 그래프에서도 그 방향성을 가진다.

Chamfer 크기 2mm 일 경우에는 Flexible Tool Holder(FTH)를 적용한 것은 Fig. 5.3의 그래프에서 X축 방향으로 Chamfer의 가공되는 부분만큼의 옅셋이 생기나 다음 부분부터는 적응된 값을 나타낸다. 반대로 FTH를 적용하지 않은 그래프는 가공시에 큰 충격으로 많은 부하가 생겨서 불규칙한 데이터를 출력한다. Z축은 Fig. 5.5에서 FTH를 적용한 것은 거의 충격에 민감하게 반응하지 않고, FTH를 적용하지 않은 그래프는 가공시부터 큰 충격을 받고 있는 것을 알 수 있다. Moment는 Fig. 5.6과 같이 FTH를 적용한 것은 일정하게 가공면에 반응하나 FTH를 적용하지 않은 것은 축을 기준으로 많이 회전하는 것을 알 수 있고, 특히 가공부 마지막 부분은 Pic. 5.1에서 거의 가공되지 않고 가공면을 디버링 툴의 회전으로 인하여 가공면을 타고 넘어 간 것을 보여준다.

Chamfer 크기 2.5mm 일 경우에는 Chamfer 크기 2mm 일 경우와 비슷한 그래프를 볼 수 있다. 단지 Fig. 5.7의 그래프에서 알 수 있듯이 FTH를 적용한 것은 Chamfer 크기가 커진 만큼 가공 시점에서 한번의 충격이 생기지만 그 부분에서 순응하여 가공되고 있음을 알 수 있다. 그러나, FTH를 적용하지 않은 것은 큰 폭으로 진동하지만 가공부 마지막 부분은 chamfer 크기 2mm 일 때와 같이 Pic. 5.3에서 거의 가공되지 않고 가공면을 디버링 툴의 회전으로 인하여 가공면을 타고 넘어 간 것을 보여준다.

그러나, Chamfer 크기 3mm에서 FTH는 비록 디버링 가공은 완결되었지만, Fig. 5.17의 그래프는 이전의 Chamfer 크기 2mm, 2.5mm 일 때 보다 진동이 큰 폭으로 하고 있음을 알 수 있다. 이것은 스프링 플런저의 스프링 장력의 조정으로

해결 될 수 있다. 그러나, FTH를 적용하지 않은 그래프들은 값이 끝까지 나오지 않았다. 이것은 Pic. 5.5와 같이 디버링 가공 실험중 디버링 툴이 가공 방향으로 진행하지 못하여 시스템을 정지시켰기 때문이다.

FTH를 적용한 부분은 Pic. 5.2, Pic. 5.4, Pic. 5.6과 같이 가공면이 고르지 않지만, 가공물에 돌출한 버를 가공하는 것에 있어서 툴과 로봇에 충격을 20% 정도 경감시키는 것을 알 수 있다.

위와 같은 실험을 통해서 Chamfer의 크기나 Bur 사이즈에 따라 FTH의 플런저 스프링 장력을 조정하면 더 좋은 가공 성능을 낼 수 있고, FTH의 스프링 작용으로 가공되지 않은 부분은 로봇 말단에 다른 디버링 툴을 부착하여 가공할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서 유연 공구 홀더를 가진 다관절 매니퓰레이터 로봇을 이용한 디버링 시스템 개발을 위하여 다음과 같은 주변 장치를 개발하였고, 디버링 실험을 통하여 Chamfer 사이즈에 대한 가공 data를 획득하였다.

- (1) 로봇에 의한 디버링 자동화에서 가장 광범위하게 사용되는 회전 버 공구(Rotary file)의 강성과 로봇의 강성으로 인해 작업시 발생할 수 있는 각종 오류를 방지할 수 있는 디버링 공구에 설치하는 유연 공구 홀더(Flexible Tool Holder)를 개발하였다.
- (2) Force Sensor의 출력데이터를 컴퓨터에서 처리하기 위해 Dynamic Logger를 통하여 필터링과 증폭을 통하여 나온 데이터를 MAX197 칩을 이용한 AD 변환기로 디지털 값으로 변환하여 pic 마이크로 프로세서에서 연산하여 Max232 통신 모듈을 통하여 컴퓨터에 메인 컴퓨터에 보낼 수 있는 데이터 처리 시스템을 개발하였다.
- (3) FTH 및 주변시스템을 이용한 실험에서 디버링 톨과 가공물의 충돌로 발생하는 힘을 줄여서 시스템의 에러를 방지하여 원활한 디버링 가공을 할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] H.Kazerooni, "Hybrid Force/Position Control in Robotic Deburring" NSF/DMC-8604123
- [2] G. M. Bone, M. A. Elbestawi, R. Lingarkar, and L. Liu, "Force Control for Robotic Deburring" Journal of Dynamic System, Measurement, and Control September 1991, Vol.113 pp.395~400
- [3] Steven D. Eppinger and Warren P. Seering, "Three Dynamic Problems in Robot Force Control" 1989 IEEE CH2750-8
- [4] 유동영, 김응석, 양해원, "파라미터 적응을 이용하는 로봇 매니퓰레이터의 위치/힘 제어" 생산공학논문집 Vol.1 No.1 1992.9
- [5] 양순동, 허만조, 원경, "주물의 디버링 로봇트에 관한 연구" 한국소성가공학회 '95춘계학술대회 논문집pp.131~144
- [6] 채호철, 한창수, "디버링 작업을 위한 로봇 매니퓰레이터의 힘제어에 관한 연구" 한국정밀공학회 '97추계학술대회 논문집pp.1169~1172
- [7] 윤성원, 김영삼, 박희재, "힘-모멘트 피드백을 통한 로봇 디버링 공정기술 개발" 한국정밀공학회 '99춘계학술대회 논문집 pp.753~756
- [8] Jong-Oh Park and Hyeck-Hee Lee "F/T Sensor Application For Robotic Deburring" '91 KACC pp.1677~1680
- [9] 신상운, 갈축석, 안두성, "숙련자 기술을 이용한 디버링 공정의 자동화에 관한 연구" 한국정밀공학회 '96춘계학술대회 논문집 pp.685~688
- [10] MASYOSHI TMIZUKA, T.M. Stepen, L.M. Sweet, "Control of Tool/Workpiece Conact Force With Application to Robotic Deburring" IEEE Journal of Robotics and Automation 1987, Vol RA-3, No.1

- [11] Asada, H., and Foldfine, N. "Optimal 컴플라이언스 Design for Grinding Robot Tool Holders" In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1985 Vol.1 March pp.316~322
- [12] Bausch, J. J. "Compliant Tools for Robotic Deburring" ASME Winter Annual Meeting December 1986
- [13] Brian J. Waibel and H. Kazerooni, "Theory and Experiments on the Stability of Robot 컴플라이언스 Control" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.7, No.1, February 1991
- [14] H. Kazerooni, J. J. Bausch and B. M. Kramer, "An Approach to Automated Deburring by Robot Manipulators" Journal of Dynamic System, Measurement, and Control December 1986, Vol.108, pp.354~359
- [15] 유범상, 오영섭, "로봇에 의한 디버링 작업의 자동화(I)" 한국정밀공학회지 제14권 제12호 pp.30~47
- [16] M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control" John Willey & Sons. 1989
- [17] 최형식, 백창열, "폐체인 구조의 새로운 다관절 로봇 매니플레이터 개발" 한국박용기관학회지 제27권 2호 pp.238~245

감사의 글

대학생활 동안 나를 격려하고 지지하며 아낌없는 사랑을 준 사람들을 만날 수 있었던 행운이라고 생각합니다. 나는 그들로 인해 행복했고 또한 많은 것을 배울 수 있었습니다.

특히, 2년이라는 짧은 대학원 생활에서 부족한 저를 엔지니어로서 공학적인 마인드를 가질 수 있도록 아낌없이 조언해주신 최 형식 지도 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 바쁘신 중에도 부족한 저의 논문을 정성스럽게 지도해주신 정 재현 교수님, 조 종래 교수님과 학부 과정에서 열정적으로 지도해주신 유 삼상 교수님께도 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다.

실험실 생활에서 힘들어 할 때 물심양면 도와주신 영식이형, 용헌이형, 동갑내기 호식이, 대원이, 정민이, 졸업동기 유신, 창열, 정재 그리고 나의 졸업 준비위원회 회원들인 후배 무경, 규득, 창만, 창훈, 석봉, 주환, 상준이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

세상을 현명하고 바르게 사는 법을 전해주신 김 성갑 선사님, 정 의림 원장님께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 또한, 강 대규님, 김 미정님, 김 종윤님께 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

후배들을 항상 따뜻하게 보살펴주신 전 병설 선배님, 채 양범 선배님께 감사드리며, 부산중앙고등학교 동문회의 선배님, 동기, 후배들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

처음 대학에 들어갔을 때 우리 문화와 예절을 가르쳐 주신 백양택건동 문회의 김 현국 선배님, 우 동훈 선배님, 그리고 동문회 모든 회원님들께

고맙다는 말을 하고 싶습니다.

영국에서 만나 많은 도움을 주신 종진이형, 은주누나, 교남이형, Martin Gill, Luc, Peter & Jenny Gill, Molean, Sukesh, 치욱이에게 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

평생을 함께 할 사랑하는 나의 벗 진호, 지해, 용훈, 용재, 성환, 재민이 모두 행복하길 바란다. 그리고, 나에게 행운을 가져다 주고 나를 믿어주는 가장 좋은 친구인 희정에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

형이 공부하는 동안 맘 고생 많았겠지만 잘 이해해준 동생 기식이와 그 무엇보다도 항상 자식을 먼저 생각하시고 헌신적인 뒷바라지를 해주신 사랑하는 부모님께 이 논문을 바치며 진심으로 감사하다는 말씀을 올리고 싶습니다.

끝으로, 나에게 많은 관심과 사랑을 준 그 모든 사람들에게 감사의 말을 전할 수 없을까봐 안타깝습니다. 내게 많은 도움을 준 사람들 중에서 혹시 내가 잊어버리고 감사하다고 말하지 못한 사람이 있다면 부디 나의 사과를 받아주길 바라며, 비록 표현은 화려하지 않지만 마음속으로는 오랫동안 깊이 감사하고 있다는 말을 하고 싶습니다.

2004 년 1 월 2 일

정 경 식